

Schriftenreihe der Reiner Lemoine-Stiftung



Philip Sterchele

Analysis of Technology Options to Balance Power Generation from Variable Renewable Energy

Case Study for the German Energy System
with the Sector Coupling Model REMod

A thesis accepted by the Department of Sustainable Systems Engineering
of the Albert-Ludwigs-Universität Freiburg in partial fulfillment of
the requirements for the degree of Doctor of Engineering Sciences (Dr.-Ing.)

Analysis of Technology Options to Balance Power Generation from Variable Renewable Energy

**Case Study for the German Energy System
with the Sector Coupling Model REMod**

by

Philip Sterchele

born in Sterzing, Italy

First examiner: Prof. Dr. Hans-Martin Henning

Second examiner: Prof. Dr. Anke Weidlich

Date of defence: 19 June 2019



Schriftenreihe der Reiner Lemoine-Stiftung

Philip Sterchele

**Analysis of Technology Options to Balance Power
Generation from Variable Renewable Energy**

Case Study for the German Energy System
with the Sector Coupling Model REMod

Shaker Verlag
Düren 2019

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Freiburg, Univ., Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2019

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6946-4

ISSN 2193-7575

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Abstract

The German Federal Government committed to drastically reduce its greenhouse gas emissions as part of its climate change mitigation strategy. This will lead to an increasing deployment of variable renewable energy sources (VRE). However, the expansion of VRE is only reasonable if their intermittent electricity generation can be effectively integrated into not only the power sector but also the transport sector and into the supply of space and process heat. To achieve this, the energy system needs to become more flexible while also being able to cope with changing weather influences. In this work, load balancing options for the German energy system are analysed based on an enhancement of the Renewable Energy Model REMod. The model is designed to determine a cost-optimal configuration of the energy system under consideration of an exogenously set limit of energy-related CO₂ emissions. In an integrative approach it depicts interdependencies between all implemented technologies and sectors of the energy system in hourly resolution. Special attention is given to power plant ramping behaviour, the variation of up to five different weather data sets, the implementation of driving profiles and charging strategies for electric vehicles as well as to the heat-controlled or power-controlled operation of heat generators in combination with thermal energy storage.

According to the results, highly flexible gas turbine power plants are becoming increasingly important as the expansion of VRE proceeds. Power plants that require several hours of start-up time exhibit yearly efficiency losses of up to 6% of their nominal efficiency increasing their emissions and making them less profitable over time. Furthermore plant operation and configuration of the energy system are substantially affected by underlying weather data. It is found that calculations based on one specific data set exhibit variations in costs and system configuration of up to 15%. Random data distribution over the observation period favours the refurbishment of buildings, the installation of more efficient technologies as well as the deployment of hydrogen-based technologies. An analysis of the motorised private transport shows that battery electric vehicles are a promising option to achieve the set emissions reduction targets, especially when they are charged in a controlled way. As for the supply of space heat and domestic hot water, heat grids and electric heat pumps represent key technologies to achieve the emission reduction targets. The controlled charging of electric vehicles and the power-controlled operation of heat generators with thermal energy storage by demand-side management (DSM) is found to be increasingly beneficial to the energy system as the set CO₂ reduction targets become more ambitious. It is shown that part of thermal power plant generation capacity, stationary power storage systems and Power-to-Gas plants can be substituted by DSM. Power curtailments as well as imports of electricity or synthetic fuels from abroad would be decreasing. In addition to lowering the total system costs, it is found that DSM efficiently integrates power generation from VRE, reducing Germany's energy dependence on other countries.

Zusammenfassung

In seiner Strategie zum Klimaschutz hat sich die Bundesregierung dazu verpflichtet seine Treibhausgasemissionen drastisch zu reduzieren. Damit verbunden ist ein fortschreitender Ausbau fluktuierender erneuerbarer Energien. Dies ist nur dann sinnvoll, wenn die dargebotsabhängige Stromerzeugung durch fEE sowohl im Stromsektor als auch im Verkehrssektor und für die Bereitstellung von Raum- und Prozesswärme genutzt wird. Um dies für verschiedene meteorologischen Bedingungen zu gewährleisten muss das Energiesystem flexibler werden. In dieser Arbeit werden Flexibilitätsoptionen im Deutschen Energiesystem basierend auf eine Erweiterung des Regenerative Energien Modells REMod untersucht. Das Modell ist konzipiert um eine kostenoptimale Zusammensetzung des Energiesystems unter Einhaltung vorgegebener Höchstwerte an energiebedingten CO₂-Emissionen zu identifizieren. Dabei werden Wechselwirkungen zwischen allen implementierten Technologien und Sektoren des Energiesystems in stündlicher Auflösung erfasst. Im Fokus der Analyse stehen insbesondere das Anfahrverhalten von Kraftwerken, die Variation von fünf verschiedenen Wetterdatensätzen, die Implementierung von Ladestrategien elektrischer Antriebskonzepte sowie der wärme- oder stromgeführte Betrieb von Wärmeerzeugern kombiniert mit thermischen Speichern.

Die Ergebnisse zeigen, dass durch den Ausbau an fEE hochflexible Gasturbinen an Bedeutung gewinnen. Kraftwerke mit mehrstündigen Anfahrprozessen weisen – bezogen auf ihre maximale Wandlungseffizienz – eine durchschnittliche Reduktion von bis zu 6 % auf. Dadurch erhöht sich deren spezifischer CO₂-Ausstoß und ihre Wirtschaftlichkeit nimmt ab. Der Einsatz der Kraftwerke sowie die Zusammensetzung des Energiesystems sind von den berücksichtigten Wetterdaten beeinflusst. So weisen Berechnungen welche auf nur einen Datensatz basieren untereinander Variationen in Gesamtkosten sowie Technologieanzahlen von bis zu 15 % auf. Eine zufällige Streuung verschiedener Wetterdatensätze über den Betrachtungszeitraum erhöht den Anteil energetisch sanierter Gebäude sowie die Installation von effizienteren und wasserstoffbasierten Technologien. Des Weiteren wird gezeigt, dass batterieelektrische Fahrzeuge eine Schlüsseltechnologie zur Erreichung der Klimaschutzziele darstellen, insbesondere dann wenn diese kontrolliert geladen werden. Bei der Bereitstellung von Raumwärme und Trinkwarmwasser spielen hingegen Wärmenetze und elektrische Wärmepumpen eine zentrale Rolle. Das kontrollierte Laden elektrischer Fahrzeuge und der stromgeführte Betrieb von Wärmeerzeugern mit thermischen Speichern gewinnen insbesondere bei ambitionierten Emissionsminderungszielen zunehmend an Bedeutung für das Energiesystem. So kann durch Lastmanagement ein Teil der ansonsten erforderlichen Kraftwerke, stationäre Batterien, Power-to-Gas Anlagen oder der anfallenden Energieimporte reduziert werden. Damit trägt Lastmanagement nicht nur zu einer Reduktion der Gesamtsystemkosten und einer effizienteren Integration von Strom aus fEE im Energiesystem bei sondern auch zu einer geringeren Energieabhängigkeit Deutschlands von anderen Ländern.

Contents

List of Figures	ix
List of Tables	xiii
List of Symbols	xv
1 Introduction	1
2 Related Work and Research Questions	5
3 The Renewable Energy Model - REMod	13
3.1 Model History	13
3.2 Model Structure	15
3.2.1 Required Input Data	16
3.2.2 Transport Sector	17
3.2.3 Process Heat Supply	19
3.2.4 Space Heat and Domestic Hot Water Supply	22
3.2.5 Electricity Base Load	25
3.3 Objective Function and Model Design	27
3.3.1 Objective Function	27
3.3.2 Problem Design and Optimisation Algorithm	34
3.4 Operating Principle	41
3.5 System Components	46
4 Modelling of Load Balancing Options	55
4.1 Excursus: Load Forecast	55
4.2 Ramping Behaviour of Energy Conversion Technologies	59
4.2.1 Term Definitions and Methodological Approach	60
4.2.2 Discussion of the Model Extension	67
4.3 Battery Electric Drive Concepts	68
4.3.1 Modelling Approach	68
4.3.2 Discussion of the Model Extension	80
4.4 Grid-Supportive Heat Generation	81
4.4.1 Operating Principle and Grouping of Heat Generators	81

4.4.2	Discussion of the Model Extension	84
4.5	Cross-border exchange of electricity	85
4.5.1	Data Processing and Power Supply Curve	86
4.5.2	Mandatory and Optional Import of Electricity	89
4.5.3	Discussion of the Model Extension	92
4.6	Power Storages and Production of Synthetic Fuels	93
4.6.1	Modelling Approach	94
4.6.2	Discussion of the Model Extension	97
5	Model Parametrisation	99
5.1	Systems with Non-Predetermined Total Amount	99
5.2	Systems with Predetermined Total Amount	101
5.3	Time Series and Further Parameters	103
5.4	Model Calibration	108
6	Results	113
6.1	Flexibility of Thermal Power Plants	113
6.1.1	Impact of Ramping Behaviour on the System Configuration	114
6.1.2	Assessment of Power Plant Operation	117
6.1.3	Variation of Weather Data and Ramping Assumptions	120
6.1.4	Summary and Conclusions	123
6.2	The Role of Alternative Drive Concepts	126
6.2.1	Electrification of the Motorised Road Transport	126
6.2.2	Cost Sensitivity Analysis of BEVs	129
6.2.3	Assessment of Controlled Vehicle Charging	133
6.2.4	Summary and Conclusions	138
6.3	Flexibility of Heat Generators and Thermal Energy Storage	140
6.3.1	Role of Electric Heat Pumps for the Supply of Space Heat	140
6.3.2	Assessment of a Power-Controlled Heat Generation	144
6.3.3	Operation of Thermal Energy Storages	151
6.3.4	Summary and Conclusions	155
6.4	The Value of Demand-Side Management	157
6.4.1	Restriction of Key Technologies	157
6.4.2	Influence of Weather Data	162
6.4.3	Cost Assessment of Demand-Side Management	174
6.4.4	Summary and Conclusions	182
7	Summary and Outlook	185
A	Model Input Parameters	191
A.1	Power Generators	191

A.2 Ramping Parameters	195
A.3 Synthetic Fuels and Steam Reforming	196
A.4 Storage Technologies	197
A.5 Space Heat and Domestic Hot Water Supply	199
A.6 Biomass	214
A.7 Process Heat Supply	220
A.8 Motorised Road Transport	225
B Results: Thermal Power Plants	233
C Results: Alternative Drive Concepts	239
D Results: Heat Generators and Thermal Energy Storage	241
E Results: The Value of Demand-Side Management	243
Bibliography	247